

文章编号 1004-924X(2015)04-0941-08

应用数字散斑相关的运动轴面位置匹配

资新运*, 耿 帅, 李永乐, 赵姝帆, 柳贵东
(军事交通学院 工程实验中心, 天津 300161)

摘要: 由于进行转轴动态扭矩测量时的旋转运动会使应变测量无法直接进行, 故提出了应用数字散斑相关技术的动态转轴表面位置匹配方法。该方法可通过对旋转运动中轴面位置的识别实现后续转轴表面应变位移的计算。搭建了运动轴面数字散斑相关实验系统, 进行了轴面灰度值稳定转角范围的标定实验、标准转角的转角位移测量实验和运动轴面位置识别实验。实验表明, 本系统轴表面图像在 $-\pi/15 \sim \pi/15$ 转角内灰度值较稳定, 该转角范围对应转动方向 160 个像素, 相关系数曲面有明显峰值, 转角为 $-\pi/15$ 和 $\pi/15$ 的相关度分别为 0.389 2 和 0.322 1, 超出该范围后图像灰度信息淹没在由轴面弧度变化引起的噪声中; 标准转角轴面位移识别精度和运动轴面位置识别精度为 1 像素。本文方法解决了旋转运动轴面的位置匹配这类大位移测量问题, 为动态转轴的位移、应变等测量问题提供了有效方法。

关键词: 数字散斑相关; 数字图像相关; 参考图像序列; 运动轴面; 位置匹配

中图分类号: O436.1; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.0941

Position matching of dynamic shaft surface based on digital speckle correlation

ZI Xin-yun*, GENG Shuai, LI Yong-le, ZHAO Shu-fan, LIU Gui-dong

(Engineering Experiment Center, Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

* Corresponding author, E-mail: zixinyun1971@163.com

Abstract: As the rotating movement in dynamic torque measurement will prevent the strain measurement directly, a position matching method for the dynamic shaft surface was proposed based on the digital image correlation method. The method recognizes the position of shaft surface in rotating movement to calculate its strain displacement. An digital image correlation experimental system for the movement shaft surface was set up, and a calibration experiment to determine the angle ranges of shaft surface with stable grey values, a measurement experiment of standard angle displacement, and an identification experiment for the position of dynamic shaft surface were set up, respectively. Experiments show that the grey value is stable when the angle range is $-\pi/15 \sim \pi/15$, in which the obvious correlation peak has been extended to 160 pixels in the rotational direction. The relevance is respectively 0.389 2 and 0.322 1 when the angles are $-\pi/15$ and $\pi/15$. Out of which, the image gray gradation information is submerged in the noise caused by the changes of shaft radians. Moreover, both the precisions of standard rotation-deflection and dynamic position of the shaft surface are 1

收稿日期: 2014-07-24; **修订日期:** 2014-09-30.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2013AA065303); 国家自然科学基金重点项目 (No. 91120306); 天津市自然科学基金资助项目 (No. 14JCQNJC01600)

pixel. The method solves the problem on position matching of the dynamic shaft surface and also provides an effective method for measuring the strain and displacement of the dynamic shaft.

Key words: digital speckle correlation; digital image correlation; reference image sequence; dynamic shaft surface; position matching

1 引言

轴扭矩是反映机械设备动态性能最典型的机械量之一,因此转轴扭矩的在线测量一直是国内外该领域的研究热点和难点。测量中由于轴质地坚硬,扭矩作用下转轴的形变量非常微小,很小的干扰都可能带来极大的误差。目前,转轴应力和应变的测量方法主要有阻抗式传感器测量、光电传感器测量以及磁电传感器测量,这些方法存在如布线困难、测量装置复杂以及测量结果易受外界电磁干扰等问题。

数字散斑相关法(Digital Speckle Correlation Method, DSCM),又称数字图像相关法(Digital Image Correlation Method, DICM),自20世纪80年代由美国的 Peter 和 Ranson^[1]等人提出以来,已在物体表面变形及物体转动等位移的测量中得到广泛应用^[2-5]。由于 DSCM 具有可全场测量、非接触、同时可以得到较高的应变位移测量精度等优点^[6-8],因此可用于测量弹性轴扭转应变。文献[9]通过采集应变前后轴表面的图像,应用 DSCM 计算轴面应变位移,实现了对轴静态扭矩的高精度测量。然而在实际工程应用中,转轴会以一定的转速旋转,这使得前后采集的轴面图像间存在较大的角位移,无法直接通过数字图像相关运算获得轴上的应变量。因此,在针对大位移或大变形的测量中,多种改进的 DICM 被提出,常用的有分段位移传递法^[10]。该方法将变形过程某一阶段的图像重新设定为参考图像,再进行变形图像的匹配;但分段位移传递法仅适用于存在一定相关程度的图像序列,对于可能出现的完全不相关的轴面图像并不适用。为实现动态转轴扭转应变的测量,需要研究运动轴面位置的匹配方法。

本文提出了基于数字散斑相关的运动轴面位置匹配方法,通过标定转轴表面灰度值稳定的转角范围,确定转轴整个表面所需的参考图像序列数,并采集整个轴表面影像作为参考图像。将目标图像与参考图像序列进行相关运算,得到匹配度最高的参考图像以及图像中心点的像素位移,最终确定目标图像在轴上的位置。该方法为进一步研究动态转轴轴面的应变位移奠定了基础。

2 数字散斑相关法

在数字图像中,从物体表面反射的光强度称为灰度值。在稳定均匀光源的理想情况下,物体表面同一点其位移前后在两帧图像上的灰度值基本不变,因此灰度值可以作为图像特征进行匹配。DSCM 便是通过分析运动、变形前后采集的两帧物体表面散斑图像灰度来获得物体运动和变形的信息,其原理如图1所示。在数字散斑场中,由于斑点具有随机性,每点周围区域的散斑分布规律各不相同,因此可在参考图像(应变前图像)中选择以 P_0 为中心、大小为 $(2M+1) \times (2M+1)$ 像素的子区。通过相关计算,在目标图像(应变后图像)中搜索相似度最大子区,得到与 P_0 相对应的中心点 P_1 ,进而获得应变位移信息。

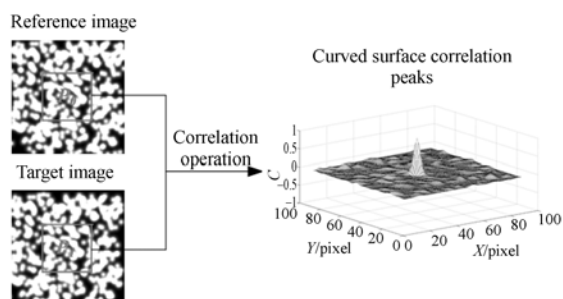


图1 数字散斑相关法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of digital speckle correlation method

使用标准化协方差函数的平形式作为相关函数:

$$C = \frac{\left\{ \sum_{i=-M_j}^M \sum_{j=-M}^M [f_1(x_i, y_j) - \bar{f}_1] \cdot [f_2(x'_i, y'_j) - \bar{f}_2] \right\}^2}{\sum_{i=-M_j}^M \sum_{j=-M}^M [f_1(x_i, y_j) - \bar{f}_1]^2 \cdot \sum_{i=-M_j}^M \sum_{j=-M}^M [f_2(x'_i, y'_j) - \bar{f}_2]^2}, \quad (1)$$

式中: f_1 和 f_2 分别为样本子区和目标子区的灰度分布函数, \bar{f}_1 和 \bar{f}_2 分别为样本子区和目标子区的平均灰度。

3 基于数字散斑相关的运动轴面位置匹配方法

对于静止轴,可直接对扭转前后的轴表面图像进行数字散斑相关计算,得到轴上应变位移。而对于高速转轴的应变位移测量,由于转轴处于旋转运动状态,前后拍摄的两帧图像是转轴在不同角位置的轴表面图像,不具有可比性,因此需要预先建立轴面在 $0 \sim 2\pi$ 转角无应变影像的背景模型作为参考图像序列;然后连续拍摄获得转动中的轴表面目标图像。对于每帧目标图像使用 DSCM,计算其在背景模型中相关性最大的参考图像以及图像中心相对其参考图像的位移量,最终得到目标图像在转轴上的实际位置。

3.1 轴面影像的背景模型建立

为获得无应变时转轴轴面散斑场的分布特征,在不施加扭矩的情况下,每转过某一固定转角 θ ,采集一次转轴表面图像,得到转轴表面在 $0 \sim 2\pi$ 的图像序列,记为 $S_1 \sim S_n$,作为参考图像,如图 2 所示。

由于轴面具有一定的弧度,轴面上同一点的像素灰度值会随转轴转动而发生变化,转角位移越大,灰度变化越明显;但当转角过大时,图像灰度信息则完全淹没在由轴面弧度变化引起的噪声中,因此,需要通过标定实验来确定灰度值稳定的转角范围。文章 4.1 部分给出了标定转角范围的方法,假设转角范围为 φ ,则每次固定转角 θ 应满足:

$$\begin{cases} \theta = \max\{\theta \mid \theta \leq \varphi\} \\ n \cdot \theta = 2\pi, n \in N_+ \end{cases}, \quad (2)$$

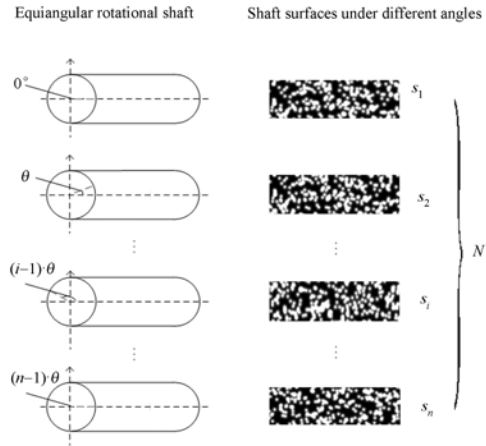


图 2 无应变时轴面影像的背景模型

Fig. 2 Background model of shaft surface images without strain

式中: n 为参考图像序列的帧数。通过在转角范围 φ 内对 θ 取最大值,可减少后续目标图像寻源计算时对相同图像区域的重复运算,同时有利于拉大目标图像与不同参考图像间的匹配度差异,便于识别。

3.2 目标图像的寻源计算

当转轴加载转矩时,通过 CCD 相机连续采集轴表面的目标图像,记为 $A_1 \sim A_j$ 。取其中 t_i 时刻的目标图像 A_i ,与参考图像序列 $S_1 \sim S_n$ 逐一进行相关运算,得到相关度最高的参考图像(记为 S_i)以及 A_i 中心点相对其参考图像的位移量,如图 3 所示。特殊地,当 A_i 有两个相关度相等的参考图像 S_i 和 S_{i+1} 时,可任选其一作为 A_i 的参考图像,在程序中通常选择序号较小的作为参考图像。应用本文方法计算目标图像在转轴实际对应位置的流程如图 4 所示。

轴面位置匹配方法为测量转轴的动态扭矩提供了有效手段。当轴面形变较大时,可直接应用位置匹配方法寻找目标图像的参考图像,然后计算目标图像两端相对其参考图像的应变位移;当轴面形变较小时,可分别在轴两端采用双相机识别轴面位置,计算轴两端的相对扭转角位移,得到

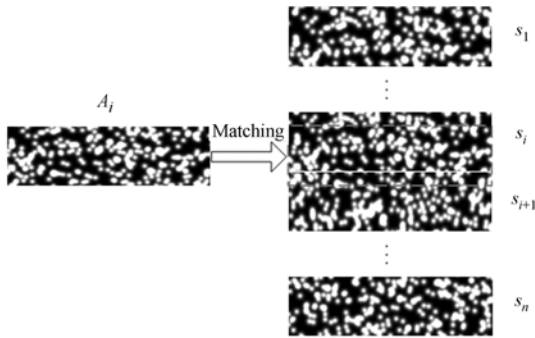


图 3 轴面目标图像的寻源计算

Fig. 3 Source searching calculation of shaft surface target image

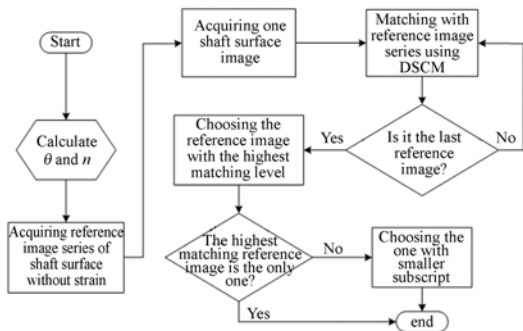


图 4 运动轴面位置匹配流程

Fig. 4 Flow chart of position matching method of dynamic shaft surface

扭矩。在对目标进行数字图像相关计算时,只需要精确到整像素便可得到参考图像,而在计算相对应应变位移时则需采用亚像素位移测量算法,以得到较高的测量精度。

4 实验

4.1 轴面转角范围标定实验

搭建实验台架如图 5 所示,其中工业相机选用 Pike-F032b 高速 CCD 相机,CCD 像素为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,相机最大帧速可达 208 frame/s ,转轴直径 $d=40 \text{ mm}$,轴长 $l=110 \text{ mm}$ 。

为便于识别,需对轴表面进行制斑处理。首先擦拭、抛光和打毛轴面,形成粗糙中的精细结构。然后对轴面反复喷涂白色和黑色的玻璃微珠漆,通过调节喷嘴大小以及喷射距离,形成雾状的细小油漆,最终使得轴面被一层黑白相间的玻璃微珠覆盖,得到便于数字散斑相关搜索的轴面散斑图像,如图 6 所示。

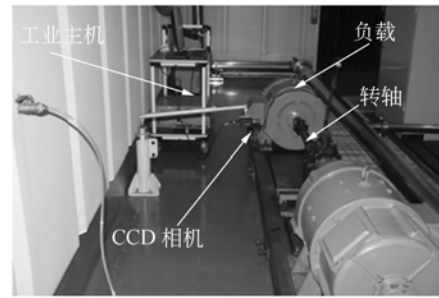


图 5 实验台架实物照片

Fig. 5 Physical photo of experiment platform

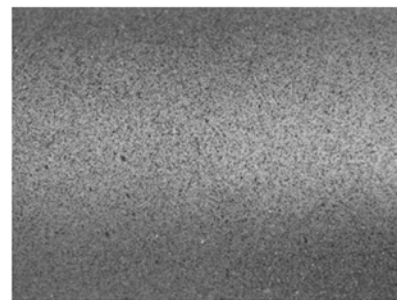
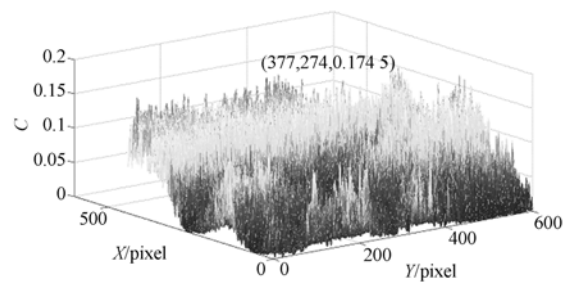


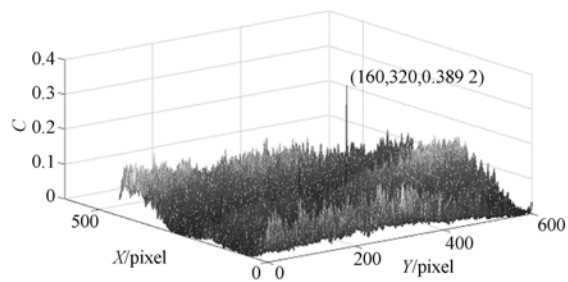
图 6 轴面散斑图像

Fig. 6 Speckle image of shaft surface

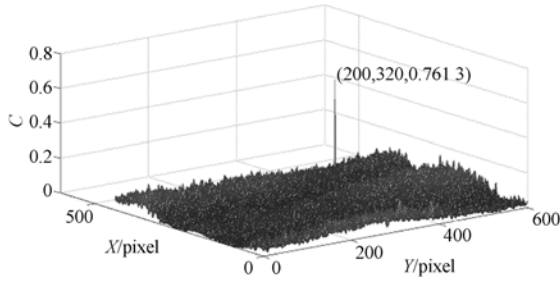
采集一帧轴面图像作为初始值,选单位转角为 $\pi/30$,分别以顺时针方向和逆时针方向,每转动 $\pi/30$ 采集一帧轴面图像,并与初始值进行数字散斑相关计算,子区中心坐标为 $(240, 320)$,子区大小为 $41 \text{ pixel} \times 41 \text{ pixel}$,计算结果如图 7 所示。



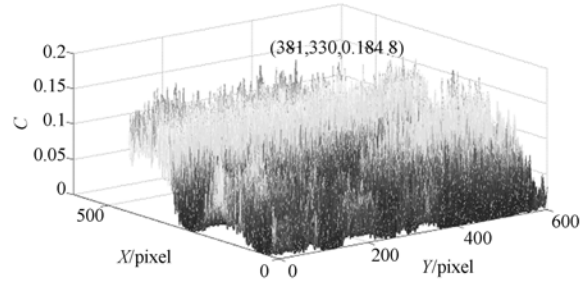
(a) $\theta = -\pi/10$



(b) $\theta = -2\pi/30$



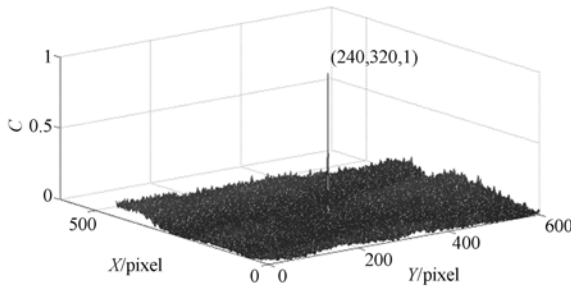
(c) $\theta = -\pi/30$



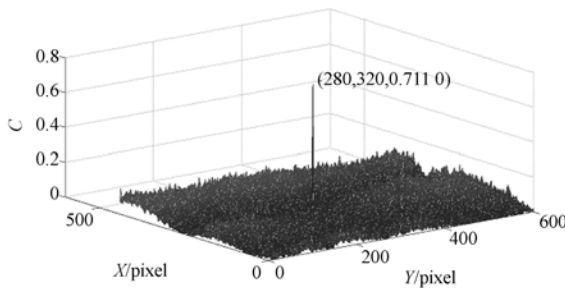
(g) $\theta = \pi/10$

图 7 不同转角下的相关运算结果

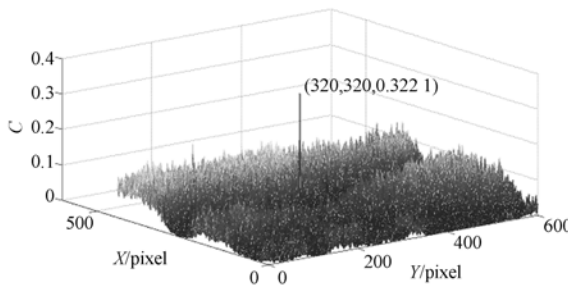
Fig. 7 Results of correlation calculation at different rotation angles



(d) $\theta = 0$



(e) $\theta = \pi/30$



(f) $\theta = 2\pi/30$

其中, $-2\pi/30 \sim 2\pi/30$ 的相关运算结果如表 1 所示, (x, y) 为图像中心点的像素位移量, C 为目标图像与参考图像的相关度。

表 1 转角 $-2\pi/30 \sim 2\pi/30$ 的相关度

Tab. 1 Relevancy of target image at angles from $-2\pi/30$ to $2\pi/30$

θ	(x, y)	C
$-2\pi/30$	(160, 320)	0.389 2
$-\pi/30$	(200, 320)	0.761 3
0	(240, 320)	1
$\pi/30$	(280, 320)	0.711 0
$2\pi/30$	(320, 320)	0.322 1

由表 1 可以发现, 在 $-2\pi/30 \sim 2\pi/30$, 转轴每转动 $\pi/30$, 轴面图像沿 x 坐标方向移动 40 pixel。当转轴转动 $-\pi/30$ 和 $\pi/30$ 时, 相关度分别由 1 降为 0.761 3 和 0.711 0, 而图 7(c)、(e) 中的相关系数有明显的峰值; 当转轴转动 $-2\pi/30$ 和 $2\pi/30$ 时, 相关度分别为 0.389 2 和 0.322 1, 由图 7(b)、(f) 可见, 噪声逐渐增加, 但相关系数仍具有明显的峰值; 当转轴转动 $-\pi/10$ 和 $\pi/10$ 时, 如图 7(a)、(g) 所示, 相关度低于 0.2 且继续转动也不再具有明显变化, 图像灰度信息已经完全淹没在由轴面弧度变化引起的噪声中。

因此, 在本系统中, 轴面图像在 $-2\pi/30 \sim 2\pi/30$ 时灰度值较稳定, 确定单位转角 $\theta = \varphi = 4\pi/30, n=15$, 轴表面参考图像序列为 $S_1 \sim S_{15}$, $-2\pi/30 \sim 2\pi/30$ 在 x 坐标方向共有 160 pixel。标定结果与轴几何尺寸、相机与测量轴的距离等因素有关, 因此每次实验前应进行标定, 标定后系统不允许改变。此外, 在采集轴面图像序列时, 考

虑图像噪声的影响,采用时间平均法^[11]消除这类时间噪声。

4.2 标准转角轴面位置匹配实验

在完成轴表面标定后,进行标准转角测量实验,以验证本文算法对不同角位移的轴面识别能力。取标准转角 σ 为 $\pi/60, \pi/5, 4\pi/3$, 分别代表相邻目标图像重合度较大、相邻目标图像互不重叠但处于转轴同一转动周期以及相邻目标图像处于转轴不同转动周期的位移情况。

首先取 $\sigma = \pi/60$ 进行实验,选择轴面任意位置并以该位置为起点,采集一帧轴表面图像作为初始目标图像 A_0 , 计算 A_0 与参考图像序列 $S_1 \sim S_{15}$ 的相关度,结果如图 8 所示。

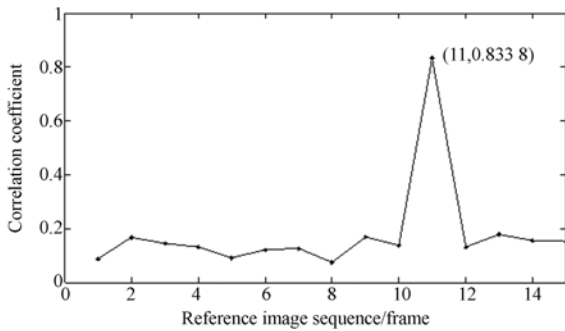


图 8 A_0 与参考图像序列 $S_1 \sim S_{15}$ 的相关运算结果
Fig. 8 Results of correlation calculation between A_0 and $S_1 \sim S_{15}$

图 8 显示了参考图像 S_{11} 与 A_0 具有最高的相关度,相关系数为 0.833 8, A_0 与 S_{11} 的相关系数曲面如图 9 所示。由图可见,参考图像 S_{11} 的中心点(240, 320)在 A_0 中位移至(206, 320), 像素位移为(-34, 0)。

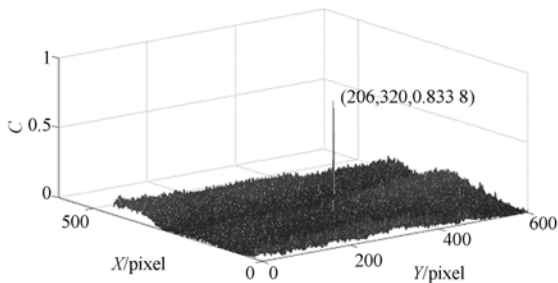


图 9 A_0 与 S_{11} 相关运算结果
Fig. 9 Result of correlation calculation between A_0 and S_{11}

每转过 $\sigma = \pi/60$ 采集一次轴表面图像,共采

集 5 帧目标图像,分别计算目标图像对应的参考图像、目标图像与参考图像的相关度以及相应的像素位移,结果如表 2 所示。

表 2 标准转角 $\sigma = \pi/60$ 的实验结果

Tab. 2 Experimental results at $\sigma = \pi/60$

Target image	Reference image	(x, y)	C
A_0	S_{11}	(206, 320)	0.833 8
A_1	S_{11}	(226, 320)	0.911 3
A_2	S_{11}	(246, 320)	0.965 5
A_3	S_{11}	(266, 320)	0.880 7
A_4	S_{11}	(286, 320)	0.677 2

同理,取 σ 等于 $\pi/5, 4\pi/3$ 进行测试实验,计算结果分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 标准转角 $\sigma = \pi/5$ 的实验结果

Tab. 3 Experimental results at $\sigma = \pi/5$

Target image	Reference image	(x, y)	C
A_0	S_3	(317, 320)	0.331 9
A_1	S_5	(237, 320)	0.986 4
A_2	S_5	(317, 320)	0.304 8
A_3	S_8	(237, 320)	0.992 4
A_4	S_9	(317, 320)	0.320 0

表 4 标准转角 $\sigma = 4\pi/3$ 的实验结果

Tab. 4 Experimental results at $\sigma = 4\pi/3$

Target image	Reference image	(x, y)	C
A_0	S_2	(222, 320)	0.891 9
A_1	S_{12}	(222, 320)	0.900 7
A_2	S_7	(222, 320)	0.902 5
A_3	S_2	(222, 320)	0.891 9
A_4	S_{12}	(222, 320)	0.900 7

由实验数据可见,在 σ 分别为 $\pi/60, \pi/5, 4\pi/3$ 的实验中,相邻目标图像像素的位移分别为(10, 0)、(240, 0)、(1 600, 0), 测量精度在 1 pixel 之内,可满足对轴表面位置的识别需求。由于每次识别都是与预存的参考图像序列进行匹配,在转动测量中不会产生累积误差,因此测量精度与角位移无关。

4.3 运动轴面位置匹配实验

为进一步验证数字相关算法对转动轴面的识

别情况,采用伺服调速电机驱动转轴,并在轴一端布置4个间隔 90° 的反射条,通过光电传感器采集轴表面反射条的位置。设定相机为外部触发,光电感应信号作为相机外部触发源。根据标定关系可知,理论上转轴相邻 90° 的两幅轴面图像间隔600 pixel。

启动电机驱动转轴,通过台架控制电机转速稳定在120 r/min,待电机转速恒定后,启动光电传感器获得光电信号,触发相机采集图像。任意取其中连续4帧图像,通过本文算法进行位置匹配,计算结果如表5所示。

表5 运动轴面识别实验结果

Tab. 5 Experimental results of position matching of dynamic shaft surface

Target image	Reference image	(x, y)	C
A ₁	S ₁₀	(177,320)	0.412 4
A ₂	S ₁₃	(297,320)	0.506 0
A ₃	S ₂	(257,320)	0.871 9
A ₄	S ₆	(217,320)	0.810 3

由表5可见,相邻目标图像的像素位移为(600,0)。本文算法对运动轴面的识别精度在1 pixel之内,可实现旋转转轴轴面位置的匹配识别。

参考文献:

- [1] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 427-431.
- [2] 陈志新,梁晋,郭成,等. 数字散斑相关法在变形测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7): 1480-1485.
CHEN ZH X, LIANG J, GUO CH, *et al.*. Application of digital speckle correlation method to deformation measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1480-1485. (in Chinese)
- [3] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 数字图像相关法测量金属薄板焊接的全场变形[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1636-1644.
HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Measurement of full-field deformations in metal sheet welding processes by image correlation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1636-1644. (in Chinese)
- [4] 孙涛,梁晋,蔡勇,等. 用数字散斑法测量铜/铝复层

5 结 论

本文针对转轴动态扭矩测量中因旋转运动而无法直接进行应变测量的需求,研究了围绕大位移、大变形问题的DSCM,提出了基于DSCM的运动轴面位置匹配方法,实现了运动轴面位置的识别,为计算后续转轴表面应变位移奠定了基础。搭建了运动轴面数字散斑相关实验系统,进行了轴面灰度值稳定转角范围的标定实验、标准转角 $\sigma=\pi/60$ 、 $\sigma=\pi/5$ 、 $\sigma=4\pi/3$ 的轴面位置匹配实验及运动轴面位置匹配实验。实验结果表明:轴面图像在 $-2\pi/30\sim 2\pi/30$ 的灰度值较稳定且在 x 坐标方向共有160个像素,因此单位转角 $\theta=4\pi/30$,轴面参考图像帧数 $n=15$;对不同标准转角位移、运动轴面角位移测量精度可控制在1 pixel内,能够满足轴表面位置的识别需求。

本文方法为解决转轴动态扭矩测量中的轴面运动问题提供了一种有效手段,同时对于DSCM在转速波动、轴扭转振动监测等动态测量领域的应用具有借鉴意义。

板拉伸变形[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2599-2606.

- SUN T, LIANG J, CAI Y, *et al.*. Measurement of deformations for copper/aluminum clad under tension with digital speckle correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2599-2606. (in Chinese)
- [5] 王永红,梁恒,王硕,等. 数字散斑相关方法及应用进展[J]. *中国光学*, 2013, 6(4): 470-480.
WANG Y H, LIANG H, WANG SH, *et al.*. Advance in digital speckle correlation method and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 470-480. (in Chinese)
- [6] CHEN X, XU N, YANG L X, *et al.*. High temperature displacement and strain measurement using a monochromatic light illuminated stereo digital image correlation system [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2012, 23: 125603.
- [7] NING J F, BRAXTON V G, WANG Y, *et al.*. Speckle patterning of soft tissues for strain field measurement using digital image correlation: pre-

- liminary quality assessment of patterns [J]. *Microsc. Microanal.*, 2011, 17: 81-90.
- [8] 王永红, 李骏睿, 孙建飞, 等. 散斑干涉相位条纹图的频域滤波处理[J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 389-395.
WANG Y H, LI J R, SUN J F, *et al.*. Frequency domain filtering for phase fringe patterns of digital speckle pattern interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 389-395. (in Chinese)
- [9] 资新运, 耿帅, 赵妹帆, 等. 基于数字工业摄像的非接触扭矩传感测量研究[J]. *传感器与微系统*, 2015, 34(4): 19-21.
ZI X Y, GENG SH, ZHAO SH F, *et al.*. Research of non-contact torque sensor measurement based on the digital industrial photogrammetry[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 34(4): 19-21. (in Chinese)
- [10] 叶南, 张丽艳. 大变形下基于数字图像相关的改进分段位移传递法[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 976-983.
YE N, ZHANG Y L. Improved fractionized displacement transfer algorithm based on digital image correlation in large deformation applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 976-983. (in Chinese)
- [11] 杨勇, 王瑛蕾, 李明, 等. 高精度数字图像相关测量系统及其技术研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(2): 197-201.
YANG Y, WANG Y L, LI M, *et al.*. Research of high accuracy digital image correlation measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 197-201. (in Chinese)

作者简介:



资新运(1971—),男,湖南衡阳人,教授,博士生导师,1993年、1996年于军事交通学院分别获得学士、硕士学位,1999年于大连理工大学获得博士学位,1999年至2001年在清华大学进行博士后研究工作,2004年至2005年赴日本高级访问学者,主要从事动力装置监测技术的研究。E-mail: zixin-yun1971@163.com



耿帅(1989—),男,山东泰安人,博士研究生,2012年、2014年于军事交通学院分别获得学士、硕士学位,主要从事传感与检测的研究。E-mail: geng-shuai7899@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)